

# 浙江大学实验报告

专业：生物医学工程

姓名：wanderingxs

学号：[数据删除]

日期：2023/5/1

地点：教七裙楼

课程名称：\_\_\_\_电子系统设计与实践\_\_\_\_ 指导老师：[数据删除] \_\_\_\_成绩：\_\_\_\_

实验名称：\_\_\_\_记忆示波器设计\_\_\_\_ 实验类型：\_\_\_\_ 同组学生姓名：\_\_\_\_

一、实验目的和要求（必填）

二、实验内容和原理（必填）

三、主要仪器设备（必填）

四、操作方法和实验步骤

五、实验数据记录和处理

六、实验结果与分析（必填）

七、讨论、心得

## 一、实验目的和要求

### （一）实验目的

1. 掌握简单系统的焊接，调试；
2. 学会用单片机进行数据处理；
3. 培养仪器系统设计与实践能力。

### （二）实验要求

1. 查找、阅读相关资料，完成实验系统的焊接、调试；
2. 利用实验系统的 ADC 接口，对一路模拟输入信号进行采样、存储，并可经 DAC 输出；
3. 系统工作模式可以通过按键设置，至少包括下列几种模式：
  - 1) 波形实时显示模式：模拟输入信号经 ADC 采样后，同时进行存储（6264）和经 DAC（0832 中的一路）输出，另一路 DAC 作为信号发生器，输出一个固定频率的周期信号，周期信号的波形可以用按键选择如下四种之一：正弦波、三角波、方波、锯齿波；
  - 2) 波形回放显示模式：模拟输入信号经 ADC 采样后，经 DAC 输出（不进行存储）；原作为信号发生器输出的 DAC，将记录在 6264 中的波形数据转换为模拟输出；（回放的波形在波形的频率和峰峰值上与实时显示时的波形应该一致）；
  - 3) 测量模式：将 ADC 输入的模拟信号的当前峰峰值、频率（或周期）等信息显示在数码管上；显示数据更新速率不小于 4HZ（每秒 4 次）；
  - 4) 通过 LED 或数码管显示当前工作模式；
  - 5) 可选功能：作为信号发生器的 DAC 输出的峰峰值、频率（周期）分档可调（不少于 4 档）。
4. 分析输入、输出波形的频率，选择合适的 ADC 采样频率；记录、分析输入、输出波形数据的峰峰值变化特点及相位变化特点、频率变化特点，讨论其成因及可能的改进方法。

## 二、实验内容和原理

### （一）实验内容

#### 1. 编程：

设置缓冲区，存储各类 buffer，例如 AD 转换值，DA 输出值，存储值等；

A/D：在定时器中断 0 处开启 AD 转换并进行 DA 输出，AD 中断里完成 AD 采样操作

各个 buffer 根据速率的不同在定时器中断 0，定时器中断 1 和主函数中更新

配置低速中断进行显示和按键处理，并且进行频率和峰峰值数据的更新

数据回放：输出在外部 RAM 中已经采集到的以往数据，并进行输出。

2. 用 ISP 工具将\*.Hex 文件下载入 89S52 处理机内，启动运行目标程序。
3. 时基 D/A 输出接示波器的 x 端；信号 D/A 输出接示波器的端。
4. 观察波形。

## （二）实验原理

1. 系统以 ATME51S 系列处理机为核心。程序的设计与编译可以选择任何 51 软件模拟器进行仿真和编译，由此产生 51 目标代码，形成目标文件（.hex）。ATMEL 提供的 Atmel Microcontroller ISP Software 可以将目标文件用 AT89ISP 编程电缆通过计算机并口下载入 51S 处理机中。程序设计可以选用汇编语言，也可以用 C 语言。
2. 将 A/D 转换器采样频率设定在某值，并在外存储器内部 6264 中设置一较大的缓冲区用作数据存储。缓冲区长度可以根据采样率与希望保存的数据时间长度计算，如采样率为 200Hz，希望存储 2 分钟的数据量，则缓冲区的长度为： $200 \times 60 \times 2$ 。系统有二路 D/A，一路由程序发生时基信号控制示波器外扫描输入（x 输入端）；另一路输出 D/A 缓冲区的数据。二路 D/A 同步则可以实现示波器数字化控制。

## （三）程序下载

89S 系列处理机采取串行数据下载方式，图 1 中程序通过计算机并行口电缆串行下载入 CP 内部闪存中。

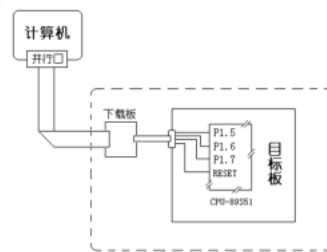


图1 程序下载原理图

## （四）数码管扫描

实验系统的显示采用 4 位共阳 8 段数码管，数码管对应阴极并联用一个 595 驱动，作为字型输出；另一个 595 作为位选驱动数码管的的阳极，两者级连，结构见图 2。595 是移位寄存器，可以将串行数据通过移位转换为并行输出，因此 CPU 仅需少量的 I/O 口（3 个）即可驱动多达 8 个 LED 数码管的显示（再多可能产生显示闪烁）。

本实验系统中 CPU 通过 P1.0、P1.1 和 P1.2 驱动显示系统。

P1.0 作为串行移位数据输出、P1.1 作为移位同步驱动脉冲信号、P1.2 作为输出同步信号。如要显示 1234。可采用时间分割的方式处理：先将‘1’字型码与对应的位选码（决定显示位置的编码）组合成 16 位串行码通过 P1.0 输出；再将‘2’字型码与对应的位选码（下一个显示位置编码）组合成 16 位串行码通过 P1.0 输出；再将‘3’字型码与对应的位选码（下一个显示位置编码）组合成 16 位串行码通过 P1.0 输出；最后将‘4’字型码与对应的位选码（下一个显示位置编码）组合成 16 位串行码通过 P1.0 输入。然后重复上述步骤，将可以在四位数码管上看到稳定的“1234”显示。

类别	型号	数量
贴片电阻	1k	6
	10k	9
	100	5
	3.3M	1
	5.1k	2
	20k	4

贴片电容	104	17
	106	9
IC 插座	DIP28	1
	DIP40	2
	DIP20	3
	DIP16	4
	DIP8	6
DB9 公头弯座		1
鳄鱼夹		3
实验板		1
芯片	12c5a32x2	1
	Max232	1
	DAC0832	2
	74HC595	3
	74LS373	1
	74LS138	1
	LM358	1
20p RAD0.1 20P	瓷片电容 20P	2
105 独石 RAD0.1	独石 RAD0.1	1
10uF	电解电容 50V/10UF	3
47uF	电解电容 25V/47uF	1
100uF	电解电容 16V/100uF	2
12MHz	XTAL1	1
发光 LED	SIP2	4

## (二) 软件

Protel99、Atmel Microcontroller ISP Software、Keil uVision2

## 四、操作方法和实验步骤

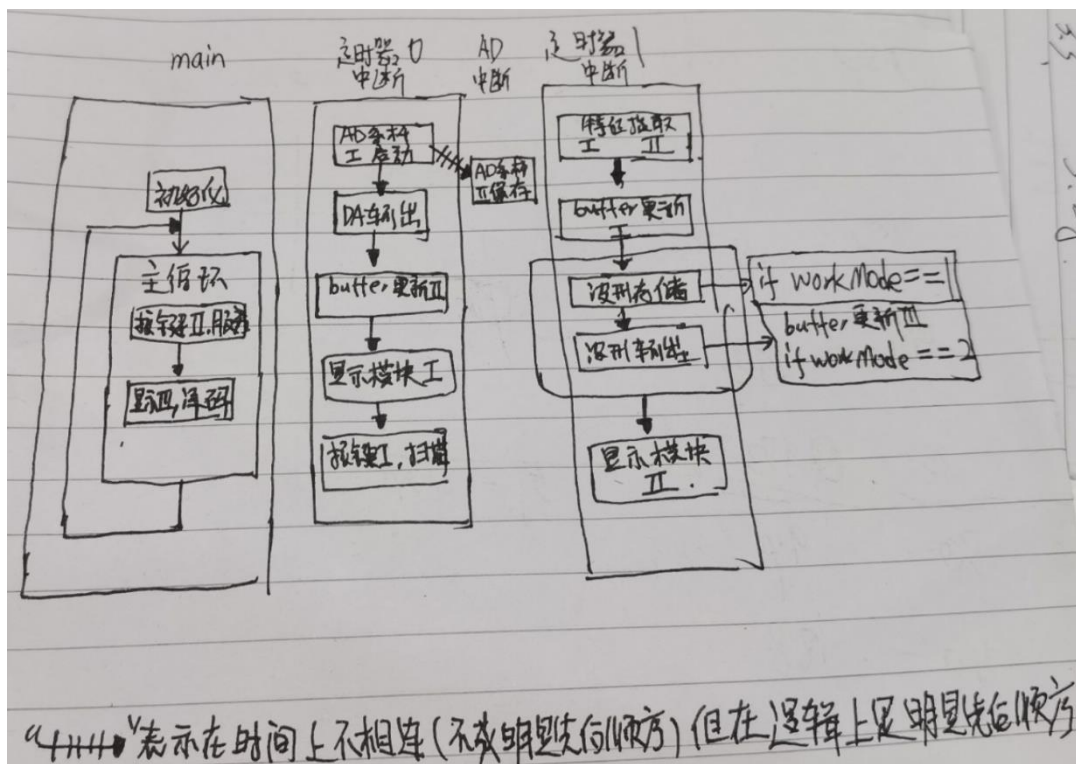
1. 按照 SCH 和 PCB 文件完成硬件电路的焊接。
2. 编写代码，调试板子部件和基本功能，如 CPU、数码管、键盘、D/A 转换器、A/D 转换器和存储器。
3. 记忆示波器系统功能实现

该项目目标实现以下功能：

开机上电复位或者按键盘按键 S1 切换到工作模式 1，该模式下读入 INPUT 管脚的信号输入并且在 CH1 输出实时采样波形，并且将波形数据存储。可以点按按键 S5-S8 从而在 CH2 切换输出四种波形：正弦波、三角波、方波和锯齿波。此外，将 CH2 输出波形选定为正弦波后，点按按键 S4 可以改变按键 S5-S8 的用途，将它们从切换波形类型变为改变波形参数。这时，S5-S8 分别是频率减、频率加、峰峰值减和峰峰值加。再次点按 S4，则将按键 S5-S8 的功能置回切换波形类型。数码管上会交替显示实时波形的频率和峰峰值信息，数码管左侧的 LCD 会指示工作状态。

点按按键 S2 会切换到工作模式 2。（回放模式）此时 CH1 仍然输出实时采样波形，但是 CH2 输出的是之前采样好的波形。数码管上交替显示的频率和峰峰值信息为回放波形的信息。数码管左侧的 LCD 同样指示工作状态。

按照功能模块划分来展示项目构建思路，总的模块框图如下：



以下介绍个模块功能和细分模块功能，和一些简要说明。具体算法实现细节详见附件项目代码。

### (1) 初始化模块

初始化模块位于主函数中，死循环前。完成微处理器降频、定时器中断 0、定时器中断 1、ADC 中断的中断初始化，并且初始化要输出的四种波形。

### (2) AD 采样模块

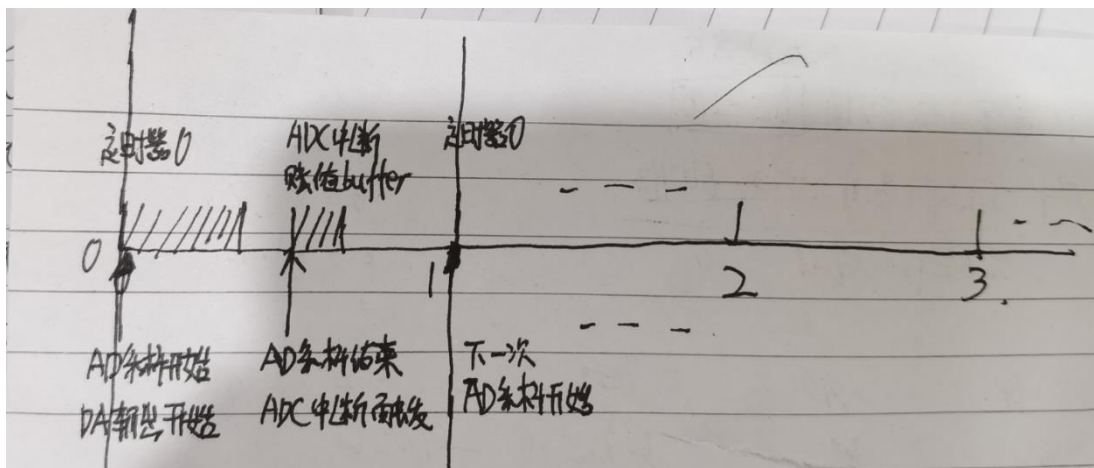
I: AD 采样启动。在定时器中断 0 中启动 ADC 中断，启动频率为 2kHz。

II: AD 采样值存储，定时器中断 0 任务执行完毕后且 AD 采样完成后，进入 ADC 中断，并将本次采样值存入输入 buffer ADC\_RESULT 中。之后进行下一次 AD 采样和采样值存贮。

### (3) DA 输出模块

在定时器 0 中断中启动 DA 输出，输出频率为 2KHz。这时候根据工作模式的不同，选择通道 1 和通道 2 输出的 buffer 值。

AD 和 DA 的时序图如下：



### (4) 信号 buffer 更新模块

I: 在定时器中断 1 中，频率为 2KHz，将实时采样输入 Buffer 赋给它对应的输出 buffer，DAC\_VALUE

II: 在定时器中断 0 中，频率为 500Hz，如果工作模式为 1，那么将存储器中存储的 4 种波形数据赋给它的输出 buffer, OUTPUT\_VALUE.

III: 在定时器中断 1 中，频率为 2KHz。如果工作模式为 2，那么将存储器中上一次采样好的波形数据赋给输出 buffer, OUTPUT\_VALUE.

### (5) 波形存储模块

在定时器中断 1 中，频率为 2KHz，如果工作模式为 1，那么将此刻的 AD 采样值存储。

### (6) 按键模块

I: 按键扫描，位于定时器中断 0 中，频率 200Hz，扫描是否有按键按下，如有获得按键编号

II: 按键服务，在主程序死循环内，完成按键响应。

(1) 工作模式选择

(2) 工作模式 1 下改变 CH2 输出波形种类

(3) 工作模式 1 下改变按键 S5-S7 用途

(4) 工作模式 1 下改变 CH2 输出正弦波的频率和幅值。

### **(7) 显示模块**

I：显示数码和状态指示灯，位于定时器中断 0 内，显示一个的频率为 200Hz，总体来说显示更新频率为 40Hz。

II：循环滚动显示频率和峰峰值。位于定时器中断 1 内。其中峰峰值显示 1s，频率显示 1s，一个显示周期共 2s，以此循环往复。

III：译码要显示的频率和峰峰值。位于主循环内，将该时刻要显示的频率或峰峰值（三位整数或一位浮点数）译码为数码管对应的显示代码，每个数字和其显示代码的关系可查阅数码管数据手册。

### **(8) 特征提取模块**

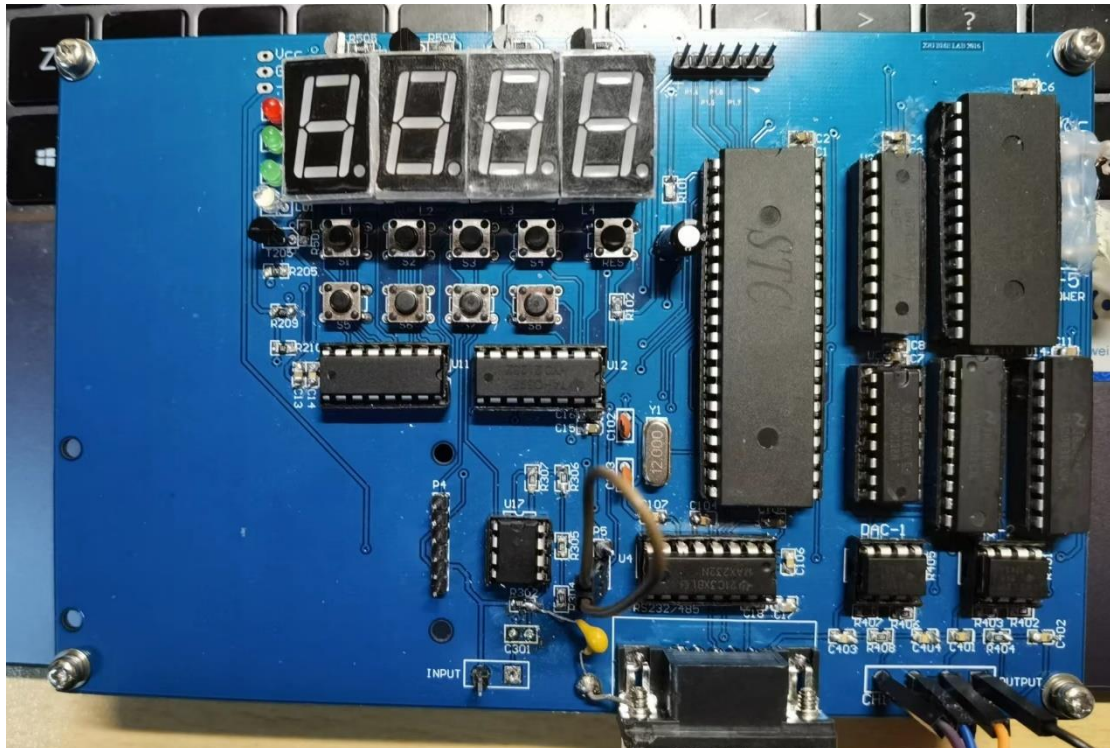
I：峰峰值测量。位于定时器中断 1 中，计算值更新频率为 2KHz。计算对象是实时采样数据的存储区，1024 字节。将计算好的峰峰值存入 `buffer_vpp` 中。

II：频率测量，位于定时器中断 1 中，计算值更新频率 2kHz，计算对象同峰峰值。将计算好的值存入 `buffer_freq` 中。



## 五、产品功能展示和定量指标探究

记忆示波器主板如下图所示。



人机接口部分主要分为显示模块、按键模块和波形输入输出模块。

显示模块由四个数码管组成，循环显示频率（三位有效数值，0-999）和峰峰值（二位有效数字，一位小数，0.0-9.9）。显示模块还包括数码管左侧的四个 LED，它们用来指示工作状态。

按键模块由 8 个按键组成。S1-S3 用来切换到对应工作模式，S4 在工作模式 1 下，用来切换按键 S5-S8 的功能（切换波形/调频调幅）。S5-S8 在工作模式 1 下，既可以切换 CH2 输出的波形类型，也可以进行 CH 2 输出波形的调频/调幅。

波形输入输出模块的输入部分为 INPUT 块。输出部分为 OUTPUT 块分为 CH1 和 CH2 两个通道。

### 5.1. 记忆示波器基本参数

- 1) A/D 采样率：2kHz;
- 2) 定频信号频率及模式：  
正弦波：2.33Hz；方波：2.45Hz；三角波：2.45Hz；锯齿波：4.90Hz；
- 3) 存储容量/回放时间：1KB / 0.5s
- 4) 测量模式显示值/刷新率：下述图表 / 2kHz；
- 5) 幅频特性、相频特性：见下述图表
- 6) 幅度测量范围：0.2V<sub>pp</sub>-2.5V<sub>pp</sub>；幅度分辨率：0.1V；
- 7) 频率测量范围：5Hz-600Hz；频率分辨率：1Hz；
- 8) ADDA 延迟时间：2.2ms（当 f=100Hz 时）；

说明：

1) 采样频率：原始原理图中选用晶振为 12MHz，那么一个机器周期是 1us。但是由于 DA 转换器的速度不足，所以必须进行降频处理。我采用了二分频，此时一个机器周期为 2us。定时器中断 T0 是 250 个机器周期触发一次，我在该中断里启动 AD 转换，因此实际定时器触

发频率和 AD 采样频率均为 2kHz.

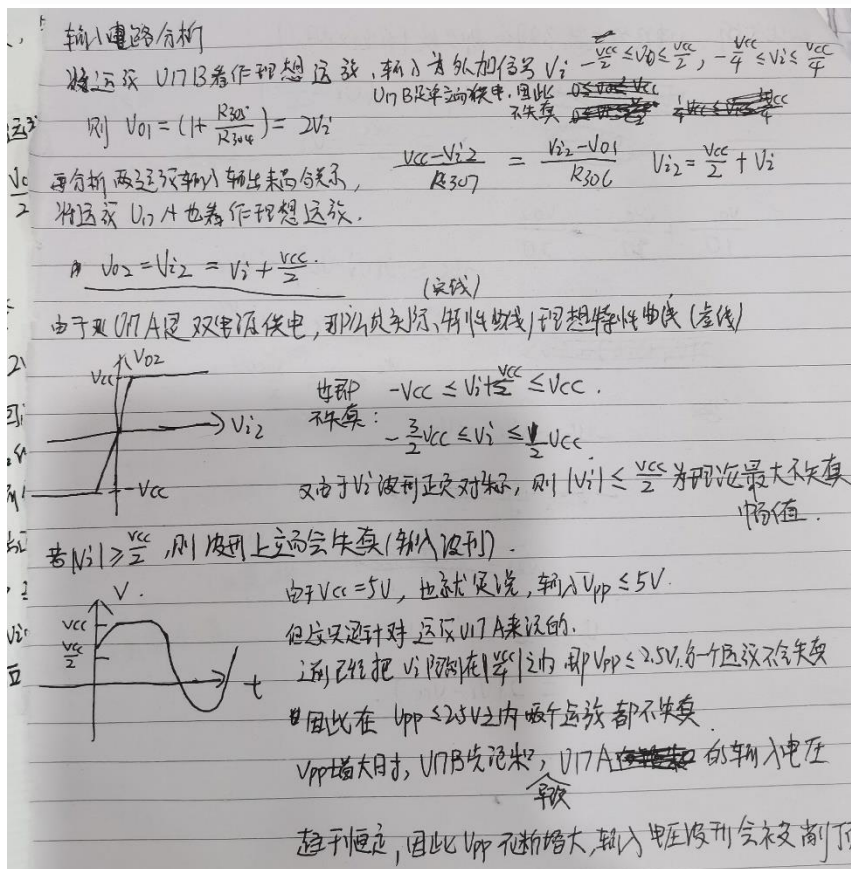
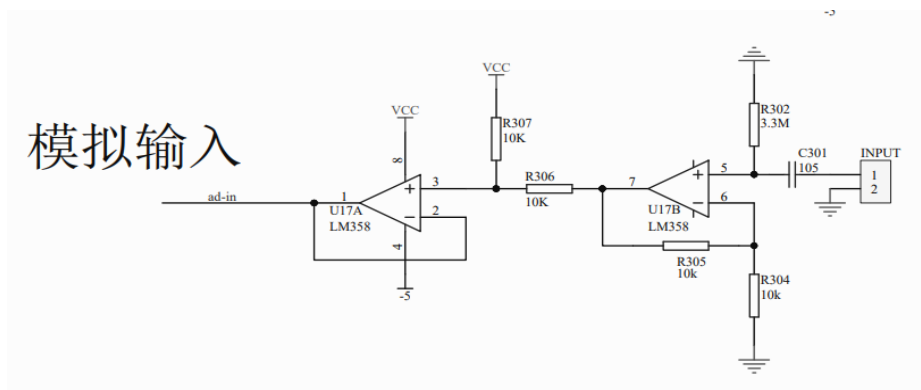
2) **测量数据更新频率:** 对于频率/峰峰值的循环交错显示频率为 2s 一个周期, 频率显示 1s, 峰峰值显示 1s, 它们值的更新在定时器中断 1 里, 频率为 2kHz.

3) **波形存储:** 对于波形的存储或输出同样在定时器中断 T1 里, 频率为 2kHz. 为了节省外部 RAM 空间, 我选择存储 1024 个采样点 (约 0.5s) 的数据, 对于测量频率范围内的信号来说足够了.

4) **ADDA 时间延迟:** ADDA 的时间延迟是由于硬件工作和软件处理引起的, 在之后的相频特性里会进行详细分析.

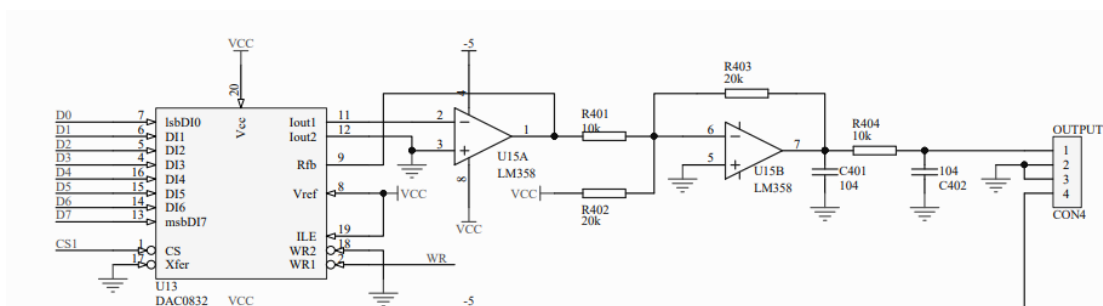
5) **测量峰峰值特性:** 本作品的测量峰峰值范围约为 0.2-2.5Vpp. 测量下限是算法精度和电路噪声造成的. 测量上限限制的原因可以从模拟输入电路和 DA 输出电路两部分分析, 详见下图:

### I. 模拟输入电路分析





## II.DA 输出电路分析



输出电路分析

U15A 视为理想运放，电压误差大，反相误差大，双电源供电。

$$V_{O1} = -V_{i1}$$

U15B 也视为理想运放，单电源供电。

$$\frac{V_{O1}}{10} + \frac{V_{CC}}{20} = -\frac{V_{O2}}{20} \quad V_{O2} = -2V_{O1} - V_{CC}$$

$$= 2V_{i1} - V_{CC}$$

又有  $V_{i1} = V_i + \frac{V_{CC}}{2}$

那么  $V_{O2} = 2V_i$

注意到输出回路(运放 U15B 7脚后接  $R_{404} = 10k$  作为输出电阻，加等于电容造成高频噪声)

它和示波器组成输出回路

因此实际输出电压应略小于  $2V_i$  ( $V_i$  有信号源输入到板子的电压)

注意到输出正确值(不失真)的幅值为  $V_{pp} \leq 2.5V$

也即  $V_{i,pp} \leq 1.25V$  时，输入输出间有较明显的 2 倍关系

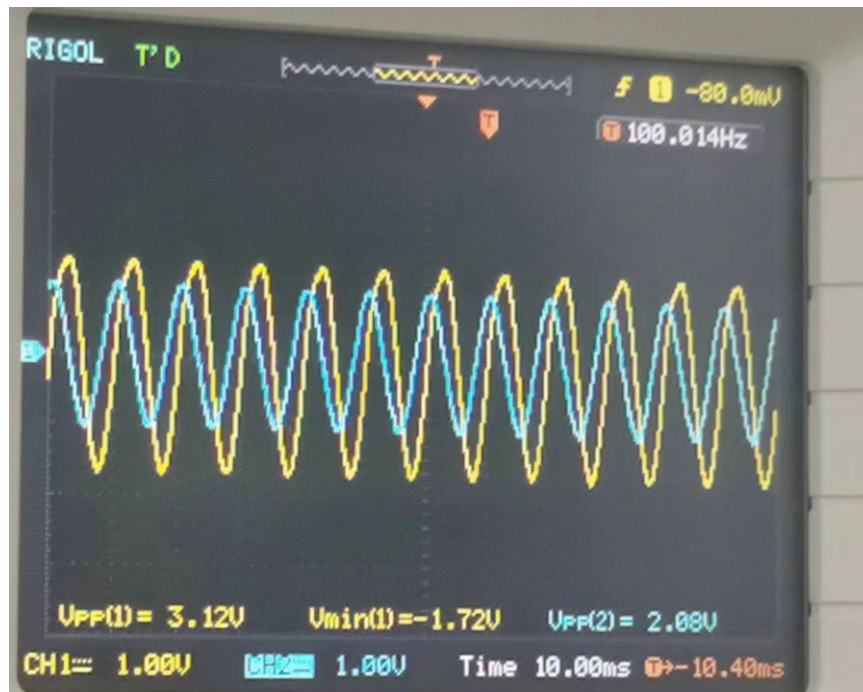
$1.25V \leq V_{i,pp} \leq 2.5V$  时，输入不失真，但输出失真了，倍率关系被破坏

到最后输出增长会变缓慢。

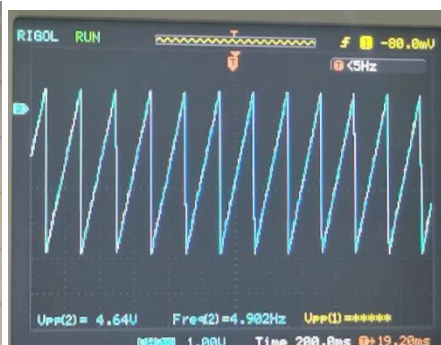
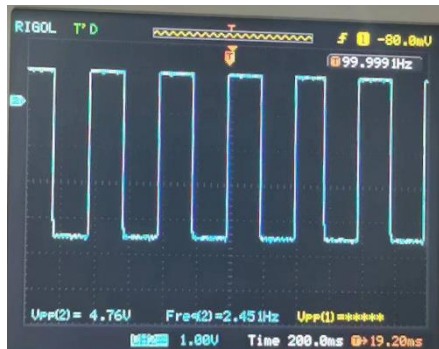
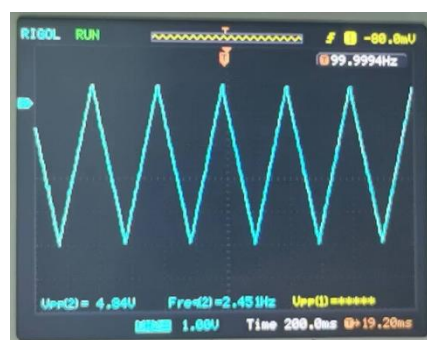
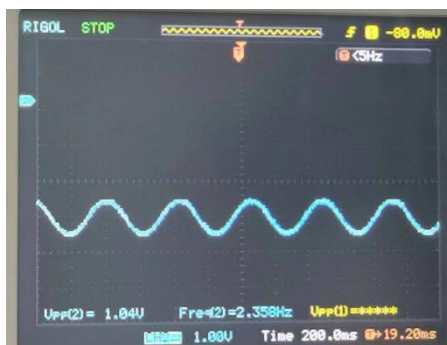
**6) 测量频率特性：** 本产品的测量频率范围为 5Hz-600Hz (指的是数码管中显示的频率值)。频率较小，输出信号频率不会失真，但是频率计算时采样区域无法采到一个完整周期内的所有采样点，所以计算会出现错误。频率较大，频率计算和输出波形频率受到采样频率的限制。采样频率为 2KHz，频率较高 (600Hz 以上)，在一个周期内的采样点数目将不足以重构波形以及计算频率，因此在较高频率下频率计算会出错，输出波形的频率也会失真。

## 5.2.实时波形显示与波形发生

对应工作模式 1（键 S1 按下，灯 LD1 亮起）。通道 2 为信号发生器发出的标准信号，频率为 100Hz，峰峰值为 2.00V。通道 1 为该示波器实时输出的波形，频率同样是 100Hz，峰峰值按照之前分析会出现非线性变化，但是相位略微落后于来自信号源输入的波形，这是因为从 AD 采样到 DA 输出需要一定时间。



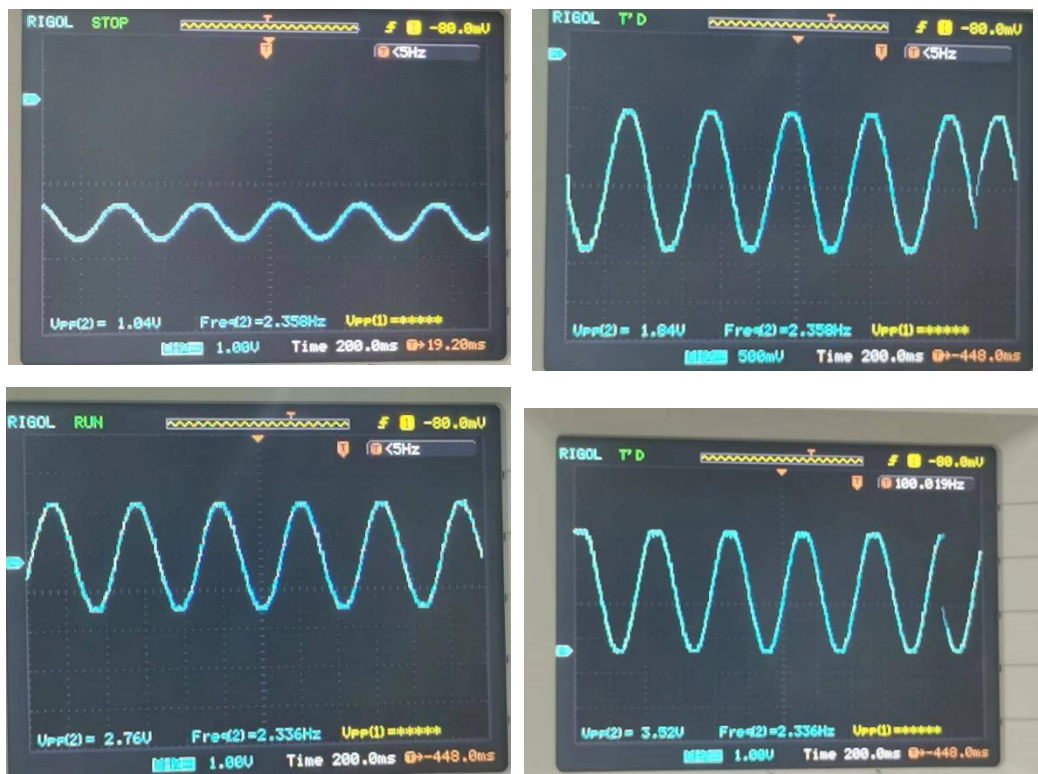
CH2 通道输出四种波形。在工作模式 1 下，按下按键 S5, S6, S7, S8 可以分别选择正弦波、三角波、方波、锯齿波进行输出，且正弦波的频率、幅度可调。下面四张图展示了输出初始频率和峰峰值的四种波形。



首先将工作模式置位 1，然后按下 S5 将 CH2 输出波形置为正弦波。按下 S4 后，可以实现调频或调幅。按键 S5，S6，S7，S8 分别是频率减，频率加，峰峰值减，峰峰值加。再次按下 S4 后可以退出调频/调幅模式回到已有波形输出模式，并且重置正弦波为初始波形。下面四张图片描述调频：



下面四张图片描述调幅：





### 5.3.波形回放

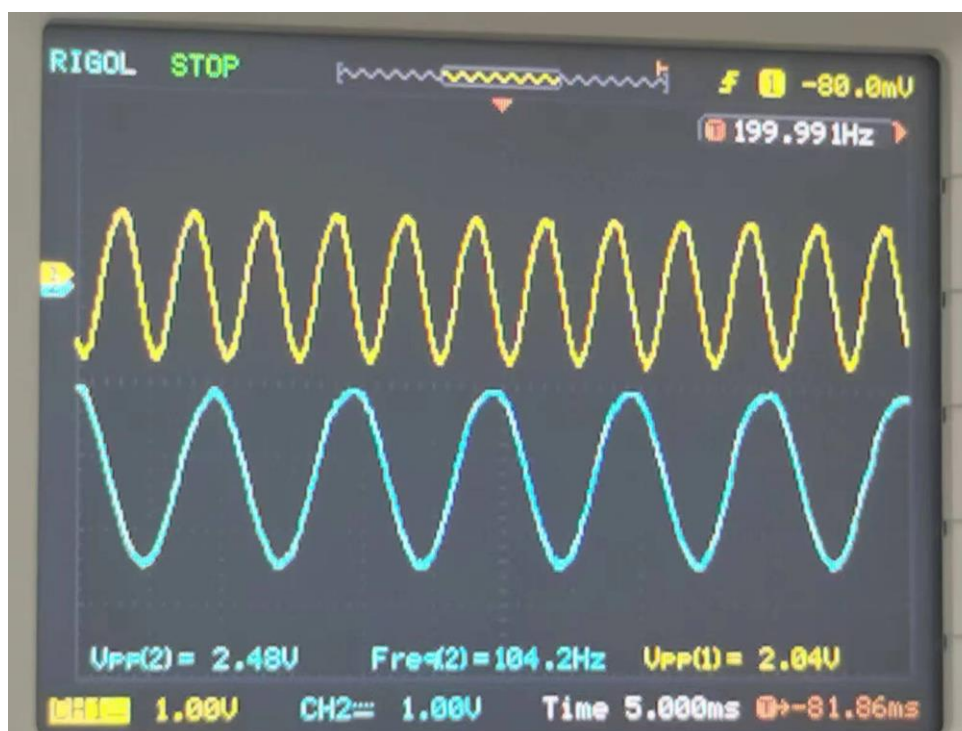
按下按键 S2，将工作模式置为波形回放模式，此时指示灯 LD2 亮。CH1 将输出实时采样波形，CH2 将输出之前在工作模式 1 下采样到的波形。

如果当前输入波形和之前输入波形一致（均为 1.3Vpp 和 100Hz，输出 Vpp 存在非线性失真），那么两路信号的频率和峰峰值几乎完全一致，如下图所示：



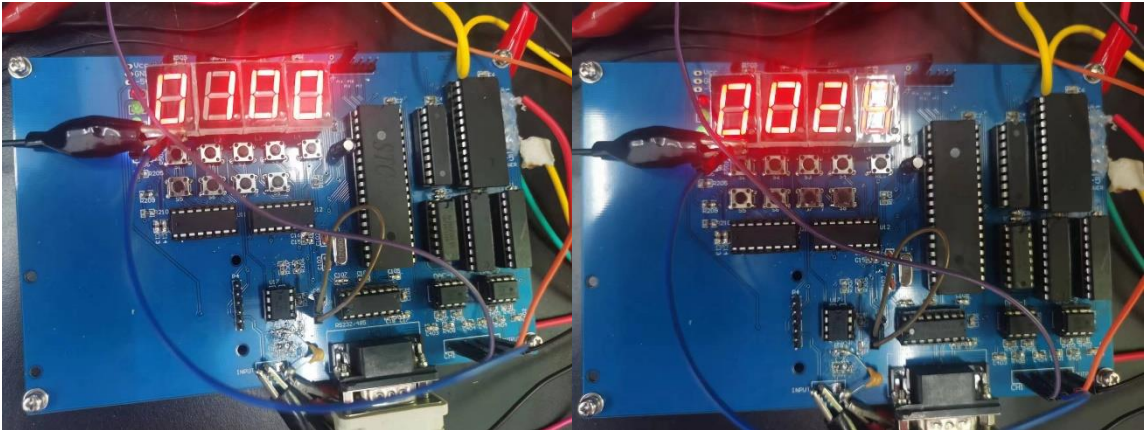
另一个测试中实时输入信号为 200Hz，1.8Vpp 的正弦波，记忆输出的波形为 100Hz，1.4Vpp 的正弦波，可以观察到此时两路信号的峰峰值和频率均不同。

两个测试共同验证了波形回放模式正常工作。



5.4. 测量输入波形峰峰值和频率

循环显示测量输入波形和频率如下两张图片所示,左侧为频率测量,右侧为峰峰值测量。



为了衡量该示波器对于输入信号频率、峰峰值测量的准确度，有必要进行以下工作：

- 1) 在一定输入频率下测量输入输出峰峰值关系
- 2) 在一定输入峰峰值下测量输入输出频率关系
- 3) 在一定输入峰峰值下测量该示波器的幅频特性
- 4) 在一定输入峰峰值下测量该示波器的相频特性

5.4.1 输入输出峰峰值关系（输入频率 100Hz）

下表中，输入理论值指波形发生器上设置的峰峰值，输入实际值指示波器测得的经波形发生器输出的波形峰峰值，输出测得值指经软件计算后数码管上显示的峰峰值，输出实际值指经 ADC 和 DAC 转换后实时显示的波形峰峰值。峰峰值测量误差是指数码管显示的测得峰峰值和输入理论值之间的误差，ADDA 误差是指输出实际值和 2 倍输入理论值之间的误差。(2 倍是由于模拟输入电路和 DA 输出电路特性导致的).

1	输入理论值/V	输入实际值/V	输出测得值/V	输出实际值/V	峰峰值测量误差(%)	ADDA误差(%)
2	0.2	0.20	0.2	0.44	0.00	10.00
3	0.4	0.44	0.4	0.80	0.00	0.00
4	0.6	0.64	0.7	1.12	16.67	6.67
5	0.8	0.84	0.9	1.44	12.50	10.00
6	1.0	1.04	1.1	1.76	10.00	12.00
7	1.3	1.34	1.4	2.28	7.69	12.31
8	1.6	1.64	1.7	2.68	6.25	16.25
9	2.0	2.08	2.0	3.04	0.00	24.00
10	2.2	2.28	2.2	3.24	0.00	26.36
11	2.4	2.48	2.3	3.36	4.17	30.00
12	2.5	2.60	2.4	3.52	4.00	29.60
13	2.6	2.72	2.4	3.60	7.69	30.77
14	2.7	2.76	2.5	3.68	7.41	31.85
15	2.8	2.88	2.5	3.76	10.71	32.86
16	2.9	2.96	2.6	3.84	10.34	33.79
17	3.0	3.08	2.7	3.92	10.00	34.67
18	3.5	3.60	3.0	4.32	14.29	38.29
19	4.0	4.12	3.3	4.72	17.50	41.00
20	5.0	5.08	3.3	5.20	34.00	48.00
21	6.0	6.12	3.3	5.28	45.00	56.00



5.4.2 输入输出频率关系（输入峰峰值 2.0V）

下表中，输入理论值指波形发生器上设置的频率，输入实际值指示波器测得的经波形发生器输出的波形频率，输出测得值指经软件计算后数码管上显示的频率，输出实际值指经 ADC 和 DAC 转换后实时显示的波形频率。频率测量误差是指数码管显示的测得频率和输入理论值之间的误差，ADDA 误差是指输出实际值和输入理论值之间的误差。

1	输入理论值/Hz	输入实际值/Hz	输出测得值/Hz	输出实际值/Hz	峰峰值测量误差(%)	ADDA误差(%)
2	0.5	0.5	95.0	0.50	18900.00	0.00
3	1.0	1.0	95.0	0.99	9400.00	1.00
4	3.0	3.0	2.0	2.94	33.33	2.00
5	5.0	5.0	5.0	5.0	0.00	0.00
6	10.0	10.0	10.0	10.0	0.00	0.00
7	20.0	20.0	20.0	20.0	0.00	0.00
8	50.0	50.0	50.0	50.0	0.00	0.00
9	100.0	100.0	100.0	100.0	0.00	0.00
10	200.0	200.0	200.0	200.0	0.00	0.00
11	300.0	303.0	300.0	294.00	0.00	2.00
12	400.0	408.0	400.0	384.00	0.00	4.00
13	500.0	500.0	500.0	520.00	0.00	4.00
14	600.0	595.0	600.0	595.00	0.00	0.83
15	650.0	657.0	649.0	641.00	0.15	1.38
16	700.0	694.0	651.0	714.00	7.00	2.00
17	800.0	808.0	652.0	804.00	18.50	0.50

5.4.3 幅频特性、相频特性测量（输入波形幅值为 2V Vpp）

下表描述输入信号一定下，输入频率对输出信号峰峰值和相位的影响。其中输出峰峰值为数码管显示的峰峰值，输出幅度（dB）的计算公式为：

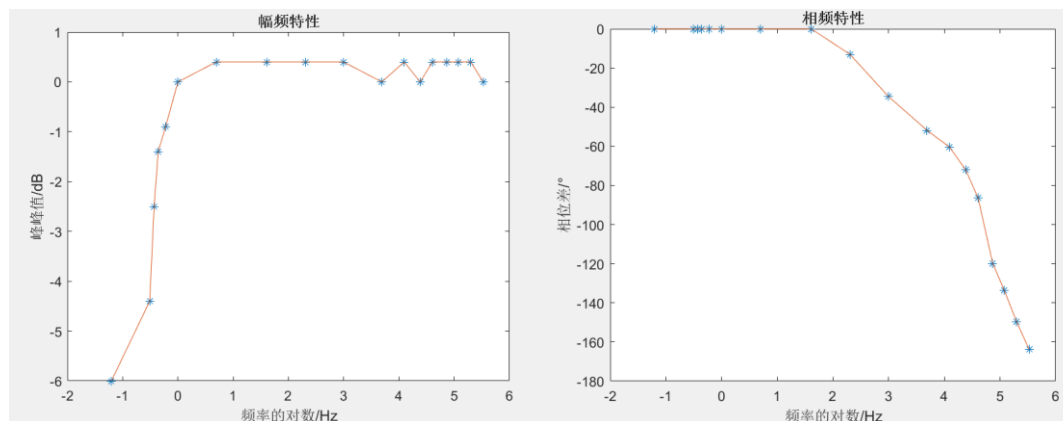
$$\text{Amp (dB)} = -20\lg(v_o/v_i)$$

延时 Δ T 为输出波形落后于输入波形的时间，相位差 Δ ψ=-2\*π\*f\* Δ T.

频率特性计算截止于 250Hz。因为此后频率和峰峰值仍然可以被测量，但是一个周期内采样点数目不足，在分析输入输出信号相位差时难以确定。

1	输入频率/Hz	输出峰峰值/V	输出峰峰值/dB	输入输出时间差/ms	输入输出相位差/°
2	0.30	1.0	-6.0	0.00	0.00
3	0.60	1.2	-4.4	0.00	0.00
4	0.65	1.5	-2.5	0.00	0.00
5	0.70	1.7	-1.4	0.00	0.00
6	0.80	1.8	-0.9	0.00	0.00
7	1.00	2.0	0.0	0.00	0.00
8	2.00	2.1	0.4	0.00	0.00
9	5.00	2.1	0.4	0.00	0.00
10	10	2.1	0.4	3.60	-12.96
11	20	2.1	0.4	4.80	-34.56
12	40	2.0	0.0	3.60	-51.84
13	60	2.1	0.4	2.80	-60.48
14	80	2.0	0.0	2.50	-72.00
15	100	2.1	0.4	2.40	-86.40
16	130	2.1	0.4	2.56	-119.81
17	160	2.1	0.4	2.32	-133.63
18	200	2.1	0.4	2.08	-149.76
19	250	2.0	0.0	1.82	-163.80

示波器幅频特性曲线和相频特性曲线如下两图所示：



根据实验数据可以得出以下结论：

- 1) 由于输入电路和输出电路设计原因，理论上输出电压峰峰值应当为输入信号峰峰值的 2 倍。但是由于多个运放会随着输入电压峰峰值的增大依次处于饱和和非线性工作区，实际输出信号的峰峰值相对输入信号的峰峰值有较大误差。0.2-1.3V<sub>pp</sub> 范围内输出信号峰峰值的线性度较好，之后线性度将迅速恶化，直到 2.5V<sub>pp</sub> 之后彻底失去线性。出于同样的原因，当模拟输入电路的运放出现饱和时，峰峰值测量误差也会增大。从实验数据可以看出，在 2.7V<sub>pp</sub> 以内误差尚且处于可接受，但继续增大输入信号峰峰值，测量值却不会继续线性增大，误差变得很大。
- 2) 由于频率计算算法和采样频率的限制，输入频率的测量范围约为 5-500Hz。频率过低由于一个数据块中未能包含输入信号一整个周期内的所有采样点，计算会出错。频率过高则由于一个周期内采样点数目过少，频率计算同样出错。在适宜测量范围内，频率测量的精确度相当高。
- 3) 该示波器的幅频特性与运算放大器的幅频特性曲线类似。输出幅值在低频段衰减迅速， $f_L$  大约是 0.6Hz。在较高频率激励下仍未发生幅值衰减，说明该示波器的  $f_H$  较大。
- 4) 该示波器的相频特性曲线同样类似于运算放大器的相频特性曲线，输入/输出相位差随着频率增大接近线性增加。

## 六、心得、体会

1. 在进行电子系统设计时，首先要初步仿真原理图设计，确保没有大的问题；然后绘制 PCB，同样要进行仿真验证。在焊接 PCB 和元器件的时候，要分模块依次焊接调试，这样可以很方便查出原理图或 PCB 设计的问题并进行改正，也容易进行焊接问题的排除。我在本次实验中将全部元件焊接上才进行调试，导致焊接问题很难查找出来，浪费了大量时间。此外，选用支持 JTAG 在线调试的微处理器可以大大加速调试过程，以后在设计原理图的时候要留出足够的调试接口。
2. 实验中所用的模拟信号输入输出电路，乍一看可以接受并输出 -V<sub>cc</sub> 到 +V<sub>cc</sub> 的信号，但事实并非如此。采用的 LM358 集成运放单电源供电下输入信号的变化范围很窄，后一级运放的输入也由此被限制了。输入模拟电路给输入信号 V<sub>cc</sub>/2 的上基线，输出 DA 电路使用两级运放电路在消除这一基线的同时使得输出电压值为输入值的 2 倍，造成了输出峰峰值的失真。之后完成模电的学习后有必要继续研究模拟量输入输出电路。若要提高幅值测量范围，应把 ADC 的参考电压调整为与输入相匹配，为此，可以考虑运放的输出范围是否可以调整，考虑使用前置放大器，或者尝试调节输入波形的参考电压。
3. 实验中测量频率和峰峰值都是对于一段时间内的采样数据进行分析，从而提取其特征。这

一测量方法适合正弦波、三角波等比较规律的波形，但是对于其他波形，比如一个周期内有两个最大值的波形会失效。可能需要考虑其他方法，如过零点检测。

## 七、分工

**wanderingxs:** 部分焊接工作、系统全部代码编写与调试、报告撰写

**zzh:** 部分焊接工作、在报告部分撰写（四、操作方法和实验步骤）提供一些协助